

эффекта толщины энергосберегающей краски и изоляции из минеральной ваты должны быть сопоставимы, что экономически невыгодно. Однако, в условиях повышенной влажности теплоизоляционные свойства минераловатных теплоизоляционных материалов резко ухудшаются и использование тонкопленочных покрытий из энергосберегающей краски становится экономически целесообразным энергосберегающим мероприятием.

#### Список использованных источников

1. Игнатова, О.А. Технология изоляционных строительных материалов и изделий. В 2 ч. Ч.2. Тепло- и гидроизоляционные материалы и изделия: учеб. пособие для студ. учреждений высш. проф. Образования / О.А. Игнатова. – М.: Издательский центр «Академия», 2012. – 288 с.

УДК 62-551.454

**Е. Ю. Воронцов , В. Г. Лисиенко , Н. Н. Пономарев**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

### ТРЕНАЖЕР-ЭМУЛЯТОР АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ НА БАЗЕ МУФЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПЕЧИ ТИПА МП–2УМ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ MATLAB

#### Аннотация

*Разработан тренажер-эмулятор адаптивной системы управления температурой муфельной электропечи типа МП–2УМ. Эмулятор позволяет получить графики изменения температуры внутри камеры печи и график изменения коэффициента передачи настройки ПИД-регулятора, а также он может быть использован для обучения персонала предприятий металлургического комплекса с целью повышения их квалификации и уровня профессиональной подготовки, а также для обучения студентов высших учебных заведений.*

*Ключевые слова: настройка, эмулятор, адаптация, электропечь сопротивления, температура.*

#### Abstract

*In this article developed a simulator-emulator adaptive control system temperature muffle furnace of the type МР–2УМ. The emulator allows to obtain graphs of the temperature inside the oven chamber and a graph of the transmission coefficient settings of PID controller and also it can be used for training of the personnel of the enterprises of the metallurgical complex with the aim of increasing their qualifications and level of professional training and also for training students of higher educational institutions.*

*Key words: tuning, emulator, adaptation, electric furnace of resistance, temperature.*

Задача создания математических моделей работающих в составе систем управления нагревом на промышленных электропечах сопротивления является очень актуальной. В этом случае, с помощью математических моделей технологического процесса и соответствующих методов и алгоритмов, решается задача оптимального управления тепловыми режимами печи по выбранным критериям. Кроме того, решаются задачи информационного обеспечения, позволяющие технологам более точно проводить процесс термообработки, предоставляя ему дополнительную информацию, недоступную для прямого измерения [1]. При этом в технологическом плане ставится задача нагрева до заданных температур за определенное время, обеспечение требуемой равномерности нагрева, снижения угара металла.

Одним из основных аспектов применения виртуальных моделей является их использование на лекциях, групповых и лабораторных занятиях, а также во время самостоятельной работы и подготовки студентов высших учебных заведений, обучающихся по технологическим направлениям, а также для обучения персонала предприятий металлургического комплекса с целью повышения их квалификации и уровня профессиональной подготовки [2].

Указанная задача решается с помощью предложенной модели тренажера-эмулятора адаптивной системы управления температурой муфельной электропечи МП–2УМ. Для исследования и реализации способа адаптации регулятора используются как линейные модели объектов, так и модели дискретной активной идентификации [3].

В качестве программного средства для моделирования использована система Matlab, которая на сегодняшний день является одним из самых высокоэффективных математических инструментов [4, 5].

Структура модели тренажера-эмулятора муфельной электропечи МП–2УМ включает в себя следующие блоки:

1. Блок модели электропечи.
2. Блок модели задания температурного режима печи.
3. Блок модели расчета температуры металла.
4. Блок модели ПИД-регулятора.

Модель блока печи представляется динамической моделью первого порядка с запаздыванием.

Для определения параметров модели печи использовались экспериментальные данные, полученные в результате эксперимента, проведенного на действующей муфельной электропечи сопротивления МП–2УМ, расположенной на термическом участке электромеханического цеха ЗАО «Уралкабель» (г. Екатеринбург, Свердловская область).

Модель блока ПИД-регулятора включает в себя расчет коэффициента теплоотдачи и нелинейной постоянной времени, а также определение параметров настройки регулятора по методу Копеловича для апериодического процесса. Блок уставки применяется для задания двухступенчатого режима работы печи. Блок расчета температуры металла включает в себя расчет температуры металла с использованием показаний эффективной температуры печи, определяемой термопарой и температурой пирометра. В данном блоке так же задаётся степень черноты нагреваемого металла.

Вывод результатов моделирования производится с помощью виртуальных осциллографов, которые отображают графики температуры внутри рабочей камеры печи, а также графики изменения параметров настройки ПИД-регулятора (коэффициента передачи  $K$ ). Для наглядного восприятия тренажера-эмулятора создадим графическую маску отдельных блоков модели.

Окончательный вид виртуальной модели представлен на рисунке 1.

Рассмотрим работу эмулятора на примере отжига титанового сплава марки ВТ1–0.

Согласно методике А.П. Копеловича рассчитываем значения настроек ПИД-регулятора для апериодического процесса регулирования [6].

Коэффициент передачи  $K_n = 0,05$  (в реальных условиях имеет размерность В/°С), постоянная времени интегрирования  $T_i = 199,2$  с, постоянная времени дифференцирования  $T_d = 33,2$  с.

Согласно условиям технологического процесса [7] зададим температурную уставку равную 520 °С.

В блоке расчета температуры металла зададим степень черноты титанового сплава ВТ1–0 равную 0,35[8].

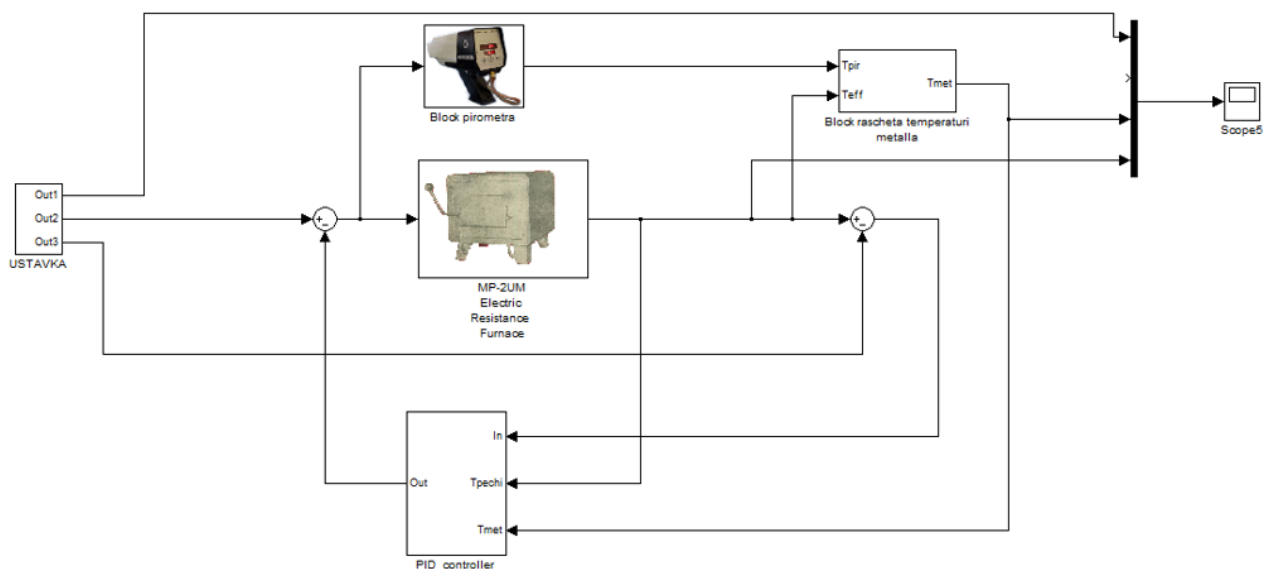


Рис. 1. Главное окно модели тренажера-эмулятора муфельной электропечи МП–2УМ

Полученные результаты представим в виде графиков. Корректировка постоянной времени объекта представлена в виде графика на рисунке 2, а изменение коэффициента передачи показана в виде графика на рисунке 3. Переходные процессы нагрева заготовки титанового сплава ВТ1–0 при управлении процессом нагрева детерминированным адаптивным регулятором представлены на рисунках 5, 6.

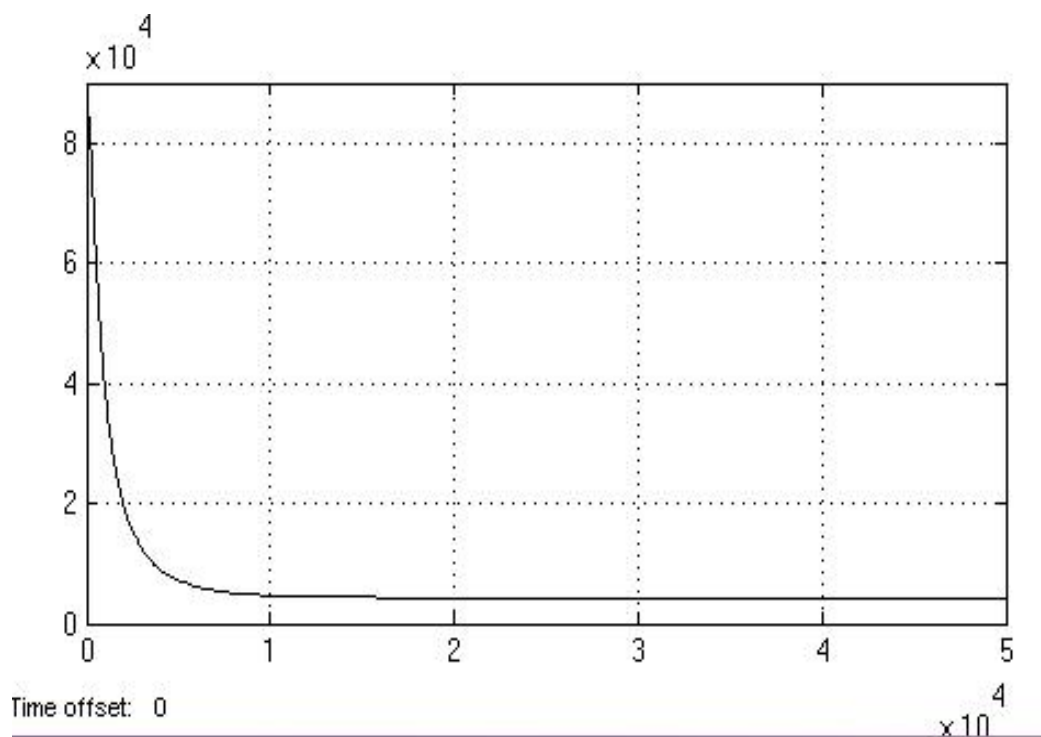


Рис. 2. Изменение значения постоянной времени печи

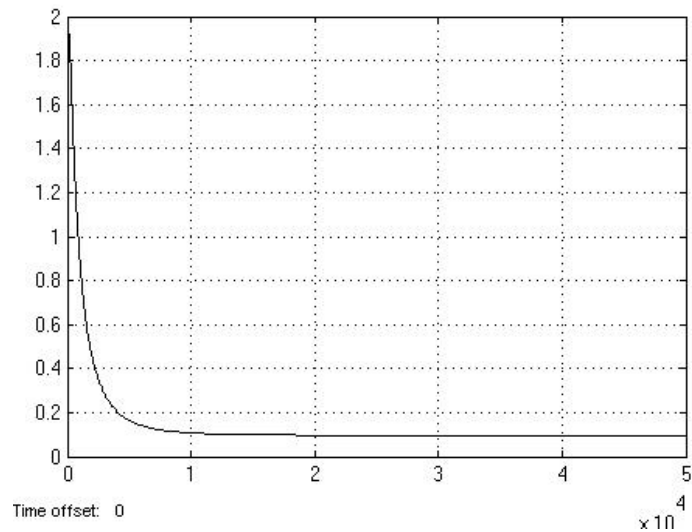


Рис. 3. График изменения коэффициента передачи

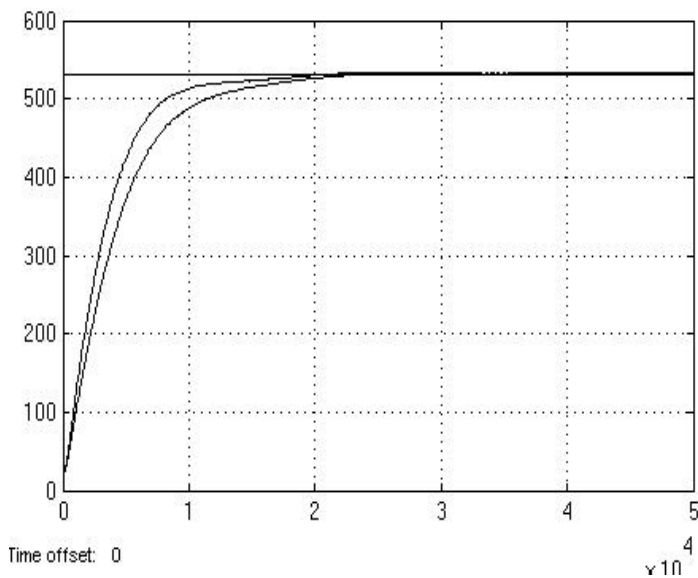


Рис. 4. Переходные процессы нагрева заготовки из титанового сплава марки ВТ1–0 в муфельной электрической печи МП–2УМ

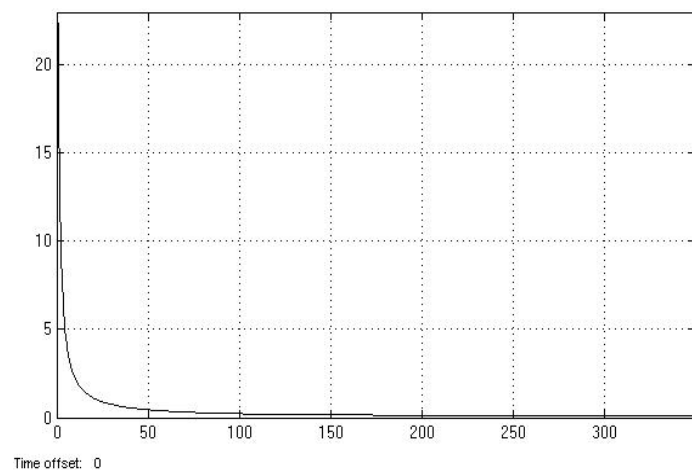


Рис. 5. Изменение скорости нагрева при управлении детерминированным адаптивным регулятором

Соберем схему автоматического регулирования температуры электрической печи сопротивления с линейным ПИД-регулятором (рисунок 6) и построим график нагрева (рисунок 7).

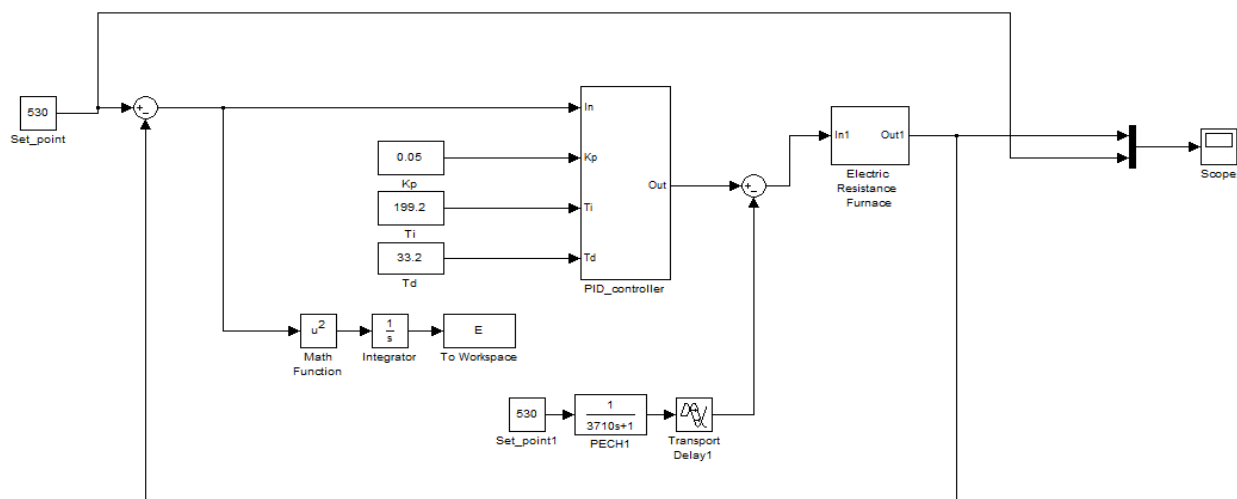


Рис. 6. Система автоматического регулирования температуры муфельной электрической печи МП–2УМ с линейным ПИД-регулятором

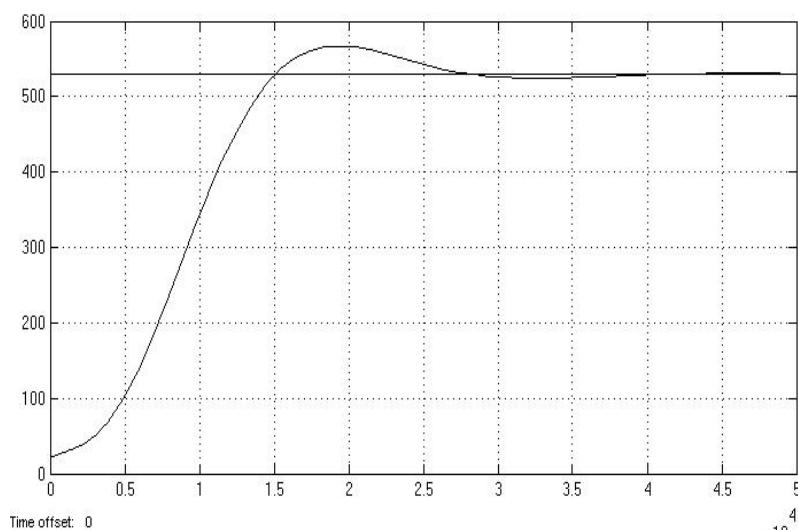


Рис. 7. График нагрева муфельной электрической печи МП–2УМ при управлении регулятором со средними настройками по методу А.П. Копеловича

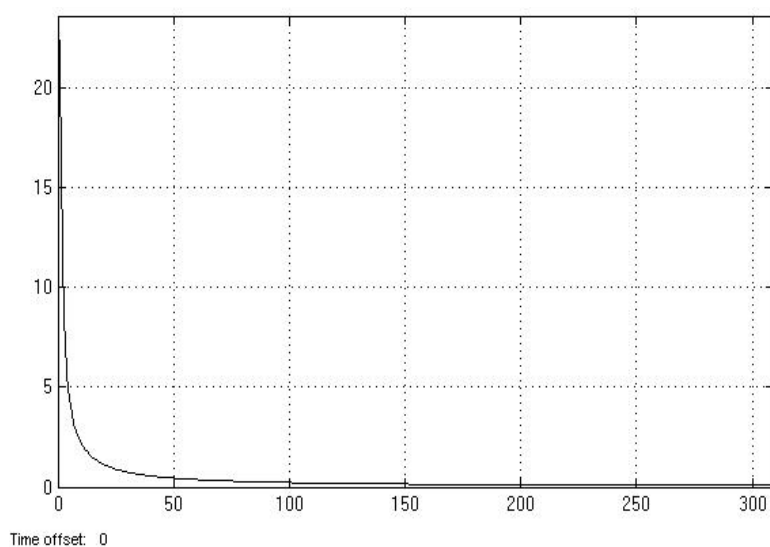


Рис. 8. Изменение скорости нагрева при управлении линейным ПИД-регулятором

Сравним полученные показатели нагрева с разными регуляторами:

1) при управлении процессом нагрева в муфельной электрической печи МП–2УМ с использованием линейного ПИД-регулятора динамические отклонения процесса регулирования температуры печи от заданного значения составило 37 °С (рисунок 8). При этом значения настроек регулятора постоянны и равны:  $K_p = 0,05$ ;  $T_i = 199,2$  с и  $T_d = 33,2$  с. Средняя скорость нагрева составила 0,088 °С/с;

2) при управлении процессом нагрева в муфельной электрической печи МП–2УМ с использованием детерминированного адаптивного регулятора температуры динамические отклонения составило 0,04 °С от заданного значения (рис. 4). На протяжении всего периода нагрева в соответствии с заданным технологическим процессом осуществлено поддержание температуры печи в заданном диапазоне. При этом коэффициент передачи изменяется в диапазоне:  $K = 1,94 \div 0,096$  (рис. 5). Средняя скорость нагрева составила 0,09 °С/с.

Структурируем данные анализа в таблицу 1.

При управлении процессом нагрева с детерминированным адаптивным регулятором средняя скорость нагрева увеличилась на 0,002 °С/с. Величина перерегулирования сократилась до 0,01 %.

Из выше сказанного можно сделать выводы, что непрерывная корректировка коэффициента передачи (рис. 7) позволила обеспечить требуемый температурный режим электропечи и осуществить равномерный нагрев по объему. Определение динамического параметра модели объекта  $T_{кор}$  позволяет оценивать и адаптировать настройки регулятора температуры печи.

Таблица 1

Результаты моделирования процесса термообработки титанового сплава BT1–0 на тренажере-эмуляторе муфельной печи МП–2УМ

Материал	$T_{зад},$ °С	Тип регулятора					
		Линейный ПИД-регулятор со средними настройками по методу А.П. Копеловича для апериодического процесса					
		$T, c$	$V_{ср.нагр},$ °С/с	Параметры настройки	$\Delta, ^\circ C$	$P, \%$	Мин. СКО
BT1-0	530	3720	0,088	$K_p = 0,05$ $T_i = 199,2c$ $T_d = 33,2c$	37	6,53	$1,725 \cdot 10^{-9}$
		Детерминированный адаптивный ПИД-регулятор					
		20252,1 – 4173,7	0,09	$K_p = 1,94-0,091$ $T_i = 199,2c$ $T_d = 33,2c$	0,04	0,01	$1,361 \cdot 10^{-6}$

Таким образом, в данной статье был разработан тренажер-эмулятор адаптивной системы управления температурой муфельной электропечи типа МП–2УМ в программной среде Matlab. С помощью данного тренажера-эмулятора можно производить моделирование процесса термообработки для различных материалов, т.е. получать графическую информацию об изменении температуры в внутри камеры печи, изменении коэффициента передачи и параметров настройки ПИД-регулятора. Конкретные результаты практического использования тренажера показаны на примере моделирования отжига титанового сплава BT1–0.

Поскольку для создания модели печи использовались экспериментальные данные, полученные в результате эксперимента, проведенного на действующей муфельной электропечи сопротивления МП–2УМ, то данный тренажер-эмулятор может использоваться

для обучения персонала предприятий металлургического комплекса с целью повышения их квалификации и уровня профессиональной подготовки, а также для обучения студентов высших учебных заведений. Тренажер может быть усовершенствован посредством улучшения блока модели печи и применения других алгоритмов настройки регулятора, указанных в [9].

### Список использованных источников

1. Лисиенко В.Г., Волков В.В., Гончаров А.Л. Математическое моделирование теплообмена в печах и агрегатах. – Киев: Наук. думка, 1984. – 232 с.
2. Особенности применения тренажеров и компьютерного моделирования на предприятиях нефтегазохимического комплекса / К.А. Карпов. – СПб.: СПбГЭУ, 2013. – 75 с.
3. Устройство адаптации регулятора температуры электрической печи сопротивления: пат. 121606, Российская Федерация: МПК G05D23/00 / Воронцов Е.Ю., Лисиенко В.Г., Пономарев Н.Н.; заявитель и патентообладатель Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. – № 2012120757/08; заявл.18.05.2012; опубл. 27.10.2012.
4. Дьяконов В., Круглов В. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 448 с.
5. Дьяконов В. П. Simulink: самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2013. – 784 с.
6. Чесноков Ю.Н., Гусев О.А. Проектирование систем регулирования на ПК / Под ред. В.В. Муханова. – Екатеринбург: УГТУ, 1999. – 108 с.
7. Самохоцкий А.И., Парфеновская Н.Г. Технология термической обработки металлов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Машиностроение», 1976.
8. Теплотехника металлургического производства. В 2 т. Т.2. Конструкция и работа печей / В.А. Кривандин, В.В. Белоусов, Г.С. Сборщиков [и др.]. – М.: МИСИС. 2001. – 736 с.
9. Guillermo J. Silva, Aniruddha Datta. S.P. Bhattacharyya. "PID Controllers for Time-Delay Systems". Boston. ISBN 0-8176-4266-8.2005.

УДК 669.162.263

**Я. М. Гордон<sup>1,3</sup>, А. Садри<sup>1</sup>, К. В. Миронов<sup>2</sup>, Н. А. Спирин<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Hatch Ltd., г. Торонто, Канада;

<sup>2</sup> ОАО «НТМК – Евраз», г. Нижний Тагил, Россия;

<sup>3</sup> ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

### РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ФУТЕРОВКИ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

#### Аннотация

*В компания «Хэтч» (Канада) разработана система неразрушающего контроля остаточной толщины огнеупорной кладки доменной печи и электропечей цветной металлургии и ферросплавной промышленности, в основу которой положен метод отраженного акустико-ультразвукового сигнала (AU–E). Данная система дополняет традиционное моделирование теплового состояния футеровки печи с использованием закладных термпар или по тепловой нагрузке на холодильники доменной печи и позволяет дополнительно определять положение трещин и аномалий, а также границу между гарнисажем и огнеупором. Рассмотрены ограничения и источники погрешностей в методе AU–E, представлено развитие и усовершенствование этого метода. Оценка точности метода подтверждена физическими замерами на остановленных доменных печах. Приведены примеры использования системы диагностики состояния футеровки различными отечественными и зарубежными заводами, а также некоторые технологические*